



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## Aerodynamisk styret udsugning

Hyldgård, Carl-Erik

*Publication date:*  
1988

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*  
Hyldgård, C-E. (1988). *Aerodynamisk styret udsugning*. Indoor Environmental Technology Bind R8808

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

-> LE

---

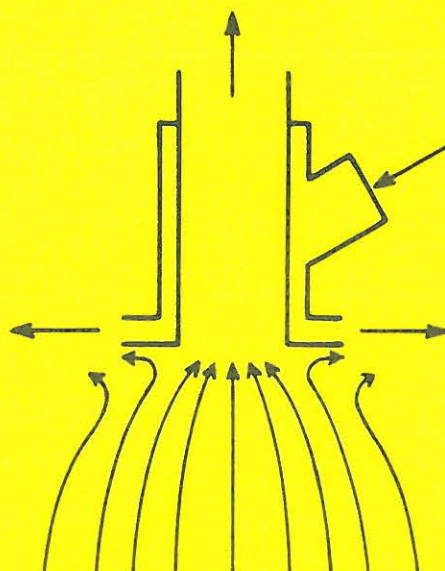
# INSTITUTTET FOR BYGNINGSTEKNIK

INSTITUTE OF BUILDING TECHNOLOGY AND STRUCTURAL ENGINEERING

AALBORG UNIVERSITETSCENTER • AUC • AALBORG • DANMARK

---

## AERODYNAMISK STYRET UDSUGNING



---

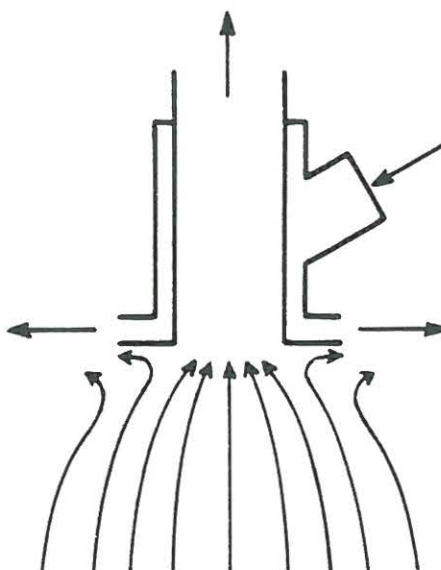
# INSTITUTTET FOR BYGNINGSTEKNIK

INSTITUTE OF BUILDING TECHNOLOGY AND STRUCTURAL ENGINEERING

AALBORG UNIVERSITETSCENTER • AUC • AALBORG • DANMARK

---

## AERODYNAMISK STYRET UDSUGNING



## INDHOLDSFORTEGNELSE

	Side
Indledning	3
1. Tredimensionale strømninger	4
1.1 Beregning af hastigheder for udsugning alene	4
1.2 Aaberg-princippet	5
1.3 Kritiske hastigheder og bevægelsesmængder	6
1.4 Måling af lufthastigheder og strømningsforløb	9
1.5 Visualisering af strømningsforløb	13
1.6 Udsugningseffektivitet	20
1.7 Støjgenerering	21
1.8 Anvendelsesområder	23
2. Todimensionale strømninger	24
2.1 Beregning af hastigheder for udsugning alene	24
2.2 Beskrivelse af forsøgsopstilling og princip	25
2.3 Måling af lufthastigheder og strømningsforløb	26
2.4 Visualisering af strømningsforløb	31
2.5 Udsugningseffektivitet	35
2.6 Støjgenerering	35
2.7 Anvendelsesområder	35
3. Konklusion	37



## Indledning

Som bekendt er udsugning karakteristisk ved, at luft strømmer henimod udsugningsåbningen ligeligt fra alle sider. Derfor falder lufthastigheden hurtigt med voksende afstand fra udsugningsåbningen. For langt de fleste udsugninger vil hastigheden allerede i 0,5 meters afstand fra åbningen være så lav, at der ingen trækproblemer er. Dette forhold gør det let at anbringe udsugningsåbninger i et alment ventileret rum. Derimod gør samme forhold det særdeles vanskeligt at anvende lokal udsugning, idet udsugningen for at være effektiv må placeres meget tæt på forureningskilden.

På AUC og andre steder har der tidligere været eksperimenteret med kombineret af indblæsning og udsugning for at opnå en forbedring af udsugningens virkning, men hidtil har der tilsyneladende ikke været større held hermed.

I efteråret 1985 fik AUC en henvendelse fra fabrikant C.P. Aaberg, som havde opnået en aerodynamisk styring af udsugningen ved hjælp af indblæsning i det tredimensionale tilfælde. Det, der stod tilbage, var at optimere systemet med hensyn til virkning, effektforbrug, komfortkrav, støjforhold m.v. På Instituttet for Bygningsteknik blev der i laboratoriet for klimateknik foretaget indledende undersøgelser via et elevprojekt i efteråret 1985. Undertegnede startede et forskningsprojekt på området i 1986, som i 1987 blev udvidet til også at omfatte det todimensionale strømningstilfælde. I juni 1987 blev en del af resultaterne offentliggjort ved et indlæg på den internationale konference Roomvent -87 i Stockholm. Der skal gøres opmærksom på, at der findes patentrettigheder på det tredimensionale "Aaberg princip" i visse lande.

Medvirkende ved rapportens tilblivelse er følgende medarbejdere. Torben Christensen har fremstillet udstyret til forsøgsopstillingerne, tegningerne er udført af June Warming, og Bodil Jensen har renskrevet rapporten. Hermed en tak for den altid beredvillige hjælp.

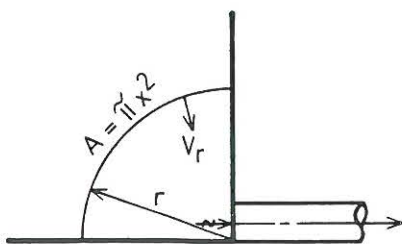
Aalborg i oktober 1987

Carl Erik Hyldgård

## 1. Tredimensionale strømninger

Ved tilfældet tredimensional udsugning skal her forstås det strømningsbillede, der opstår, når en rund udsugningsåbning får den omgivende luft til at strømme mod åbningen fra alle sider. Hvis tilstrømningen fra nogle sider forhindres fås al- ligevel et tredimensionalt strømningsbillede.

### 1.1. Beregning af hastigheder for udsugning alene



Figur 1. Principskitse af konventionel udsugning mellem bord og bagvæg.

$r$  = afstand fra hjørne  $\approx$  afstand fra åbningen (m)

$v_r$  = hastighed i afstanden  $r$  (m/s)

$A$  = arealet af 1/4 kugleskal med radius  $r$  (m<sup>2</sup>)

$V_u$  = udsuget luftmængde (m<sup>3</sup>/s)

Anbringes en cirkulær sugeåbning som vist på figur 1 i et hjørne mellem et bord og en lodret bagvæg fås en stort set ligelig tilstrømning mod sugeåbningen fra rumvinklen  $\pi/4$ . I afstanden  $r$  vil strømningshastighederne være numerisk af samme størrelse, og de vil være rettet mod åbningen. De af udsugningen forårsagede strømningshastigheder  $v_r$  vil da være givet ved:

$$v_r = \frac{V_u}{A} = \frac{V_u}{\pi r^2} \quad (1)$$

Dette vil altså sige, at teoretisk set aftager  $v_r$  proportionalt med kvadratet på afstanden fra sugeåbningen. Her er dog set bort fra udsugningens udstrækning, d.v.s. sugeåbningens

diameter for en cirkulær udsugning, ligesom der er set bort fra gnidningsmodstand ved fladerne og påvirkning fra omgivelserne.

For eksempel for værdien  $V_u = 300 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0833 \text{ m}^3/\text{s}$  fås:

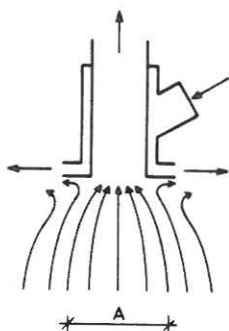
$$v_r = \frac{0,0833 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot r^2} = \frac{0,0265}{r^2}$$

hvor  $r$  er afstanden fra åbningen i m og

$v_r$  er hastigheden i m/s.

I det følgende vil denne beregnede sammenhæng blive sammenlignet med målinger.

### 1.2. Aaberg princippet



Figur 2. Principskitse. A = effektivt udsugningsområde.

Hovedprincippet er, at der ved en radial indblæsning rundt om udsugningsåbningen medrives luft fra omgivelserne, og denne medrevne luft reducerer udsugningsområdet til kun at omfatte det på figur 2 benævnte område A. Dette system kan herved virke effektivt på større afstand end en konventionel udsugning kan. Men der må være den rette balance mellem udsugning og indblæsning. Er indblæsningen for svag, bliver radialstrålen bøjet om og trukket med ind i udsugningen. Er indblæsningen for kraftig øges hastighederne overalt, men det effek-

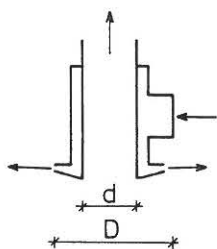
tive udsugningsområde A formindskes. En nærmere undersøgelse af sammenhængen mellem udformning af mundstykket, gribehastigheder og virkningsgrad har derfor været nødvendig.

### 1.3. Kritiske hastigheder og bevægelsesmængder

For en given mundstykkeudformning, udsugningsluftmængde og indblæsningsspalttehøjde findes der en kritisk indblæsningshastighed, som skal overskrides for at få det i figur 2 viste strømningsbillede. Under den kritiske hastighed bøjes indblæsningen om og suges med ud, hvorved der blot er opnået en forringet virkning af en konventionel udsugning. Ved den kritiske hastighed er virkningen helt modsat den ønskede, idet forurening blæses bort fra mundstykket i stedet for at blive ført ind mod udsugningsåbningen. Ved overkritisk hastighed vil strømningsbilledet se ud som vist i figur 2. Der er en vis hysteresevirkning i strømningsbilledet således at, hvis indblæsningshastigheden skal sænkes til  $v_1$  for at få strømningsbilledet til at slå om, skal indblæsningshastigheden øges til en værdi  $v_2 > v_1$  for at give strømningsbilledet i figur 2 igen. Da forstyrrelser fra omgivelserne f.eks. hidrørende fra forbipasserende personer kan bevirke omslag i strømningsbilledet, skal den kritiske hastighed her defineres som den hastighed  $v_2$ , der efter ganske få sekunder kan oprette strømningsbilledet i figur 2. Øges indblæsningshastigheden yderligere, øges medføringshastighederne overalt, også i område A, men en større del rives med indblæsningsluften, så det effektive udsugningsområde A formindskes lidt. Men selv ved meget høje indblæsningshastigheder fås i princippet strømningsbilledet i figur 2, og jo højere indblæsningshastigheden er, des mere upåvirkeligt bliver strømningsbilledet af forstyrrelser fra omgivelserne.

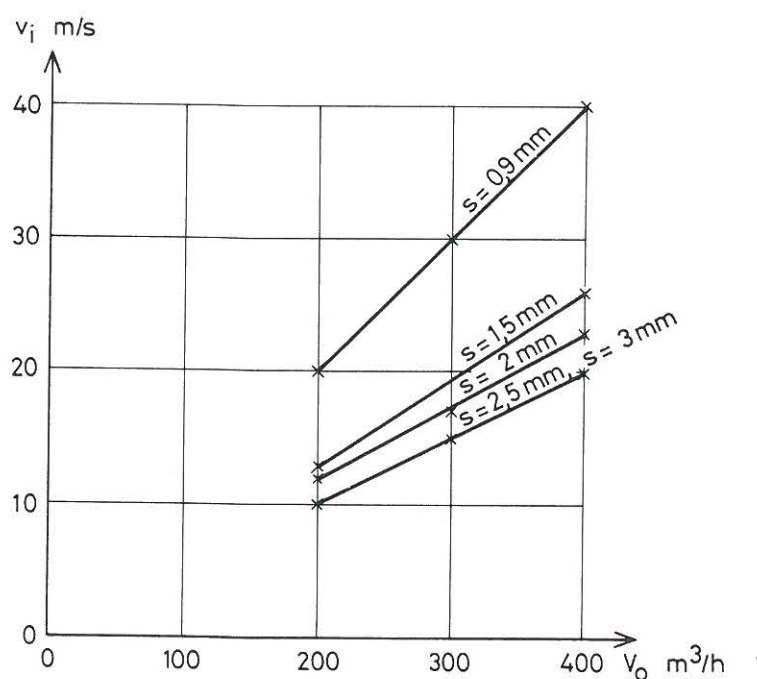
Tidligere har der været anvendt ganske små indblæsningsspalttehøjder  $s$ , f.eks. 0,15 mm, og meget høje indblæsningshastigheder  $v_i$ , f.eks. 30-50 m/s. Herved skabes megen støj, og der kræves et meget højt leveringstryk til indblæsningen. På AUC er indblæsningshastigheden formindsket uden at ødelægge den ønskede virkning.





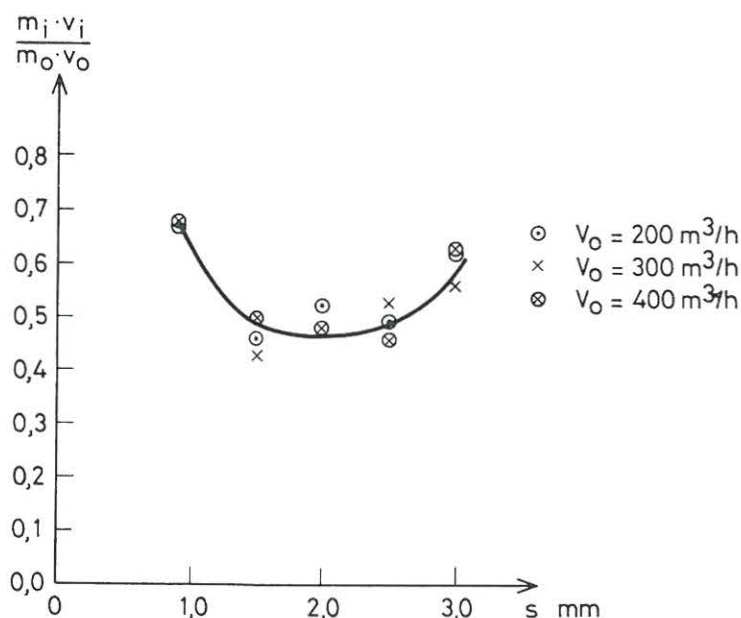
Figur 3. Principskitse af det ved AUC udviklede mundstykke.  
Den bagudhældende forreste flange giver lavere kritisk hastighed og meget mindre tryktab.

På figur 3 ses en principskitse af det på AUC udviklede mundstykke. Der har været afprøvet forskellige konstruktioner, men den på figur 3 viste virkede bedst, alle parametre taget i betragtning. For denne konstruktion, hvor  $d = 103 \text{ mm}$  og  $D = 223 \text{ mm}$ , er der fundet de på figur 4 viste kritiske indblæsningshastigheder som funktion af spaltehøjden  $s$  og udsugningsluftmængden  $V_0$ .



Figur 4. Kritisk indblæsningshastighed  $v_i$  som funktion af den udsugede luftmængde  $V_0$ . Spaltehøjden  $s$  er parameter.

Sættes bevægelsesmængden i indblæsningen ved kritisk hastighed  $= m_i \cdot v_i$  i forhold til bevægelsesmængden i udsugningen  $= m_o \cdot v_o$  fås den i figur 5 viste bemærkelsesværdige sammenhæng.

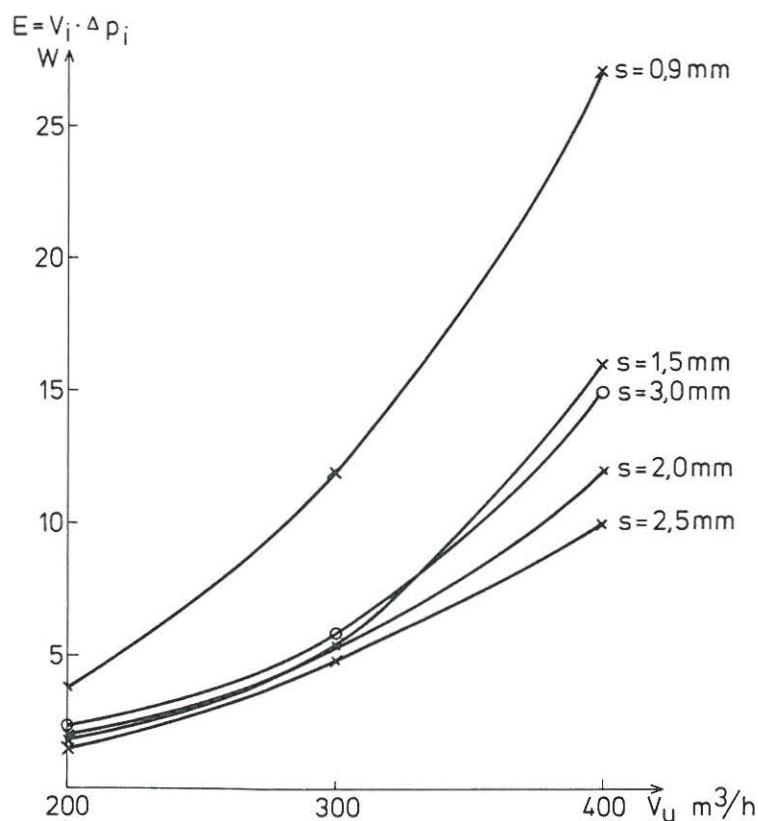


Figur 5. Forholdet mellem bevægelsesmængderne i indblæsning og udsugning som funktion af spaltehøjden  $s$  ved kritisk indblæsningshastighed. Udsugningsluftmængden  $V_o$  er parameter.

Figur 4 og 5 kunne tyde på, at den optimale spaltehøjde ligger på 2-2,5 mm.

Tages der imidlertid hensyn til effektforbruget ved indblæsningen, som bortset fra tab i ventilator m.v. er  $E = V_i \cdot \Delta p_i$ , hvor  $V_i$  er den kritiske indblæsningsluftmængde, og  $\Delta p_i$  er tryktabet over mundstykket, som ved målinger har vist sig at være  $= 1,18 \cdot \frac{1}{2} \rho v_i^2$ , fås den i figur 6 viste sammenhæng.

Af figur 6 fremgår, at ud af de undersøgte spaltehøjder  $s$  giver 2,5 mm det laveste energiforbrug. Da denne spaltehøjde ifølge figur 5 ligger i nærheden af minimumværdien for bevægelsesmængdeforholdet og ifølge figur 4 tillige giver den laveste nødvendige indblæsningshastighed, vælges denne spaltehøjde til alle følgende undersøgelser.



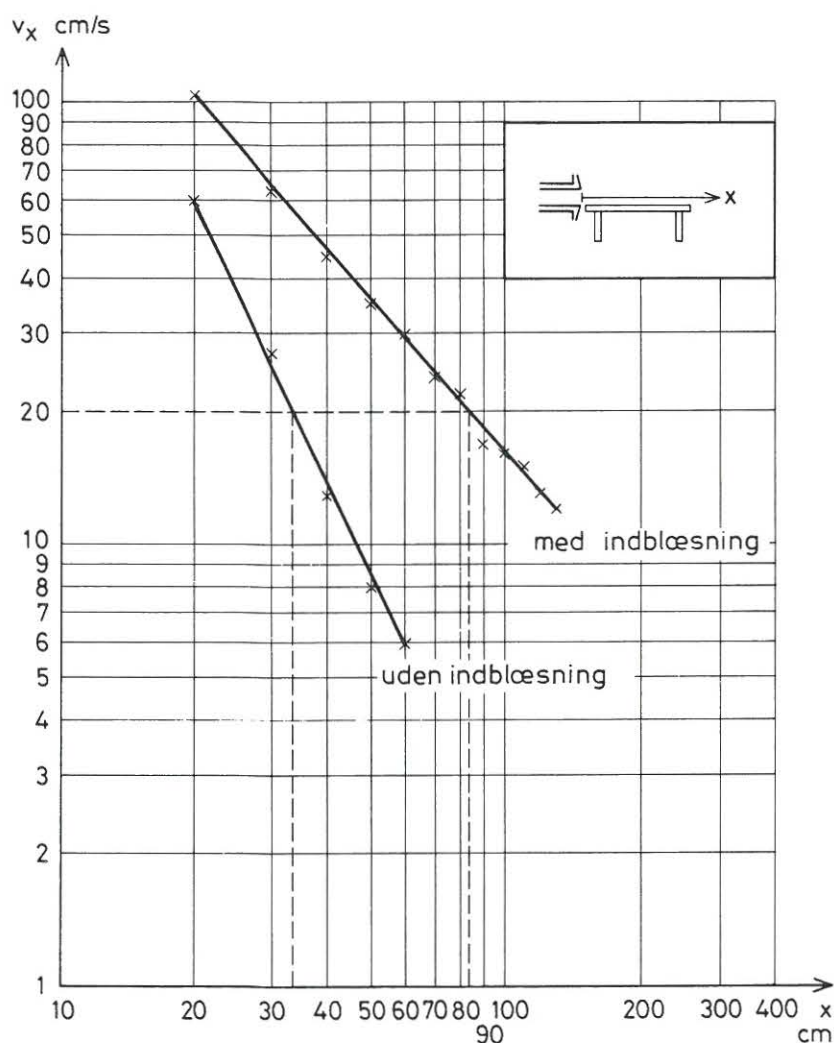
Figur 6. Nettoenergiforbruget  $E$  ved kritisk indblæsning som funktion af den udsugede luftmængde  $V_u$ . Indblæsningsspalttehøjden  $s$  er parameter.

#### 1.4. Måling af lufthastigheder og strømningsforløb

Det der er afgørende for, om en lokal udsugning får fat i en lokal forurening er forholdet mellem forureningens egenhastighed og gribehastigheden. Gribehastigheden er derfor af væsentlig betydning.

Anbringes mundstykket ved bagkanten af et bord som vist på den lille skitse i figur 7, kan gribehastighederne måles i centerlinien dels for udsugning alene, dels for udsugning med indblæsning på. På figur 7 er angivet de målte gribehastigheder for en udsugning på  $400 \text{ m}^3/\text{h}$ , dels uden indblæsning, dels med en indblæsningshastighed på  $25 \text{ m/s}$ .

Det fremgår af figur 7, at ønsker man f.eks. en gribehastighed på  $20 \text{ cm/s}$ , har udsugning alene kun en rækkevidde på  $34 \text{ cm}$ ,



Figur 7. Gribehastigheder  $v_x$  i centerlinien ved udsugning af  $400 \text{ m}^3/\text{h}$  fra bagkanten af et bord, dels med indblæsningshastighed 0, dels med indblæsningshastigheden  $25 \text{ m/s}$ .

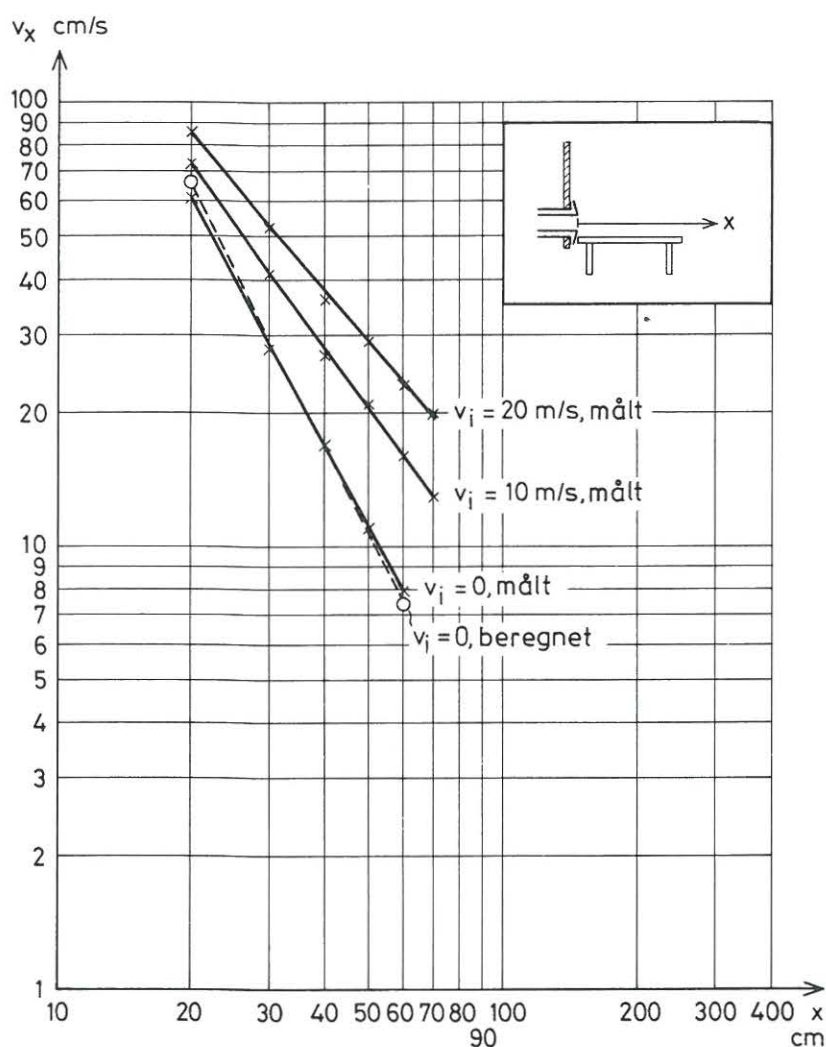
mens den samme udsugning med indblæsning tilføjet giver en effektiv rækkevidde på 84 cm.

Forsynes bordet, der er vist i figur 7, med en bagvæg, hvori mundstykket anbringes, forøges gribehastigheden for udsugning alene, idet der nu kun udsuges fra rumvinklen  $\pi/4$ . Herved formindskes forskellen mellem de effektive rækkevidder, når der køres uden og med indblæsning. Der er dog stadig en væsentlig fordel ved indblæsningen, som figur 8 viser. En for-



del ved anvendelse af en bagvæg er, at Coandaeffekten er årsag til, at de kritiske indblæsningshastigheder sænkes væsentligt. Ved en udsugning på  $400 \text{ m}^3/\text{h}$  er den kritiske indblæsningshastighed således så lav som  $6,5 \text{ m/s}$ . Med bagvæg kan man derfor mere frit vælge indblæsningshastighed under hensyn til den ønskede gribehastighed og til det tilladelige støjniveau.

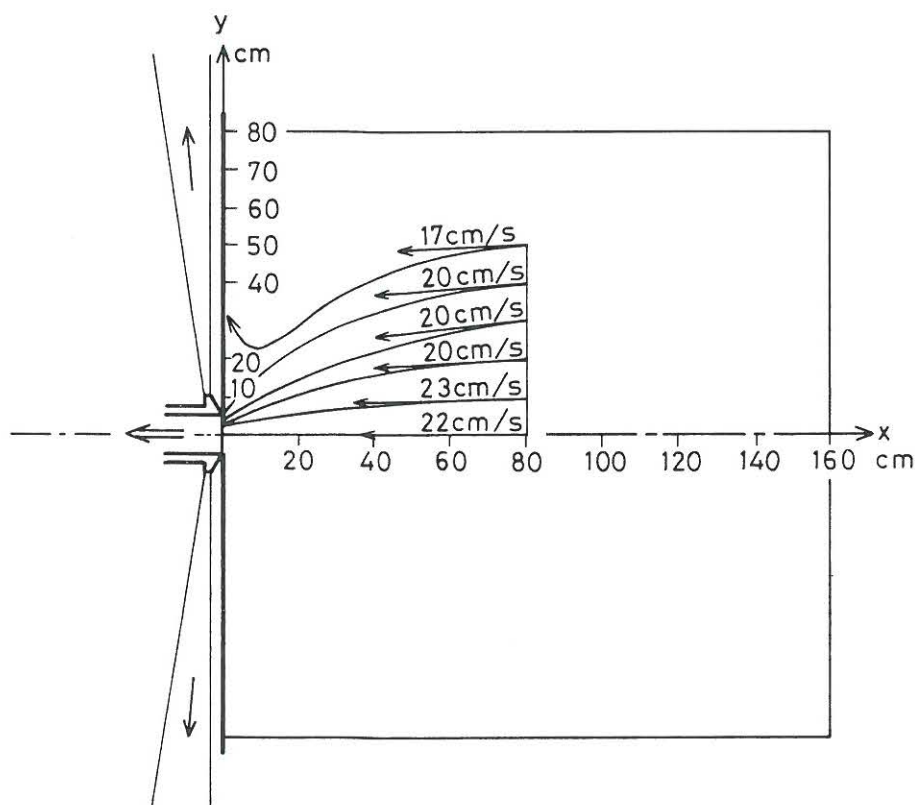
På figur 8 er desuden indtegnet en linie, der angiver gribehastigheder for udsugning alene beregnet ud fra ligning (1). Der er god overensstemmelse mellem målte og beregnede værdier.



Figur 8. Gribehastigheder  $v_x$  i centerlinien ved udsugning af  $300 \text{ m}^3/\text{h}$  fra et bords bagflange, dels ved udsugning alene, dels ved indblæsningshastighederne  $v_i = 10 \text{ m/s}$  og  $v_i = 20 \text{ m/s}$ . Nederste trediedel af indblæsnings-spalten er afdækket.

Af figur 8 fremgår, at gribehastigheden i centerlinien kan øges blot ved at øge indblæsningshastigheden. Til gengæld bliver afsugningsområdet, d.v.s. det på figur 2 angivne område A formindsket. Ved at øge indblæsningshastigheden kan man således skabe en mere koncentreret afsugning på større afstand.

Strømningsbilledet foran munden, når indblæsning er i gang, ses af figur 9, der omhandler samme tilfælde som figur 7 med indblæsningshastigheden 25 m/s. På figur 9 ses bordet ovenfra. I 80 cm's afstand fra munden er angivet de målte hastigheder i forskellige vandrette afstande fra aksen og strøm-linier bestemt ved røgforsøg er indtegnet.



Figur 9. Vandret hastighedsprofil 80 cm foran munden ved udsugning af  $400 \text{ m}^3/\text{h}$  fra bagkant af bord uden bagflange med indblæsningshastigheden 25 m/s. Strøm-linier er indtegnet.

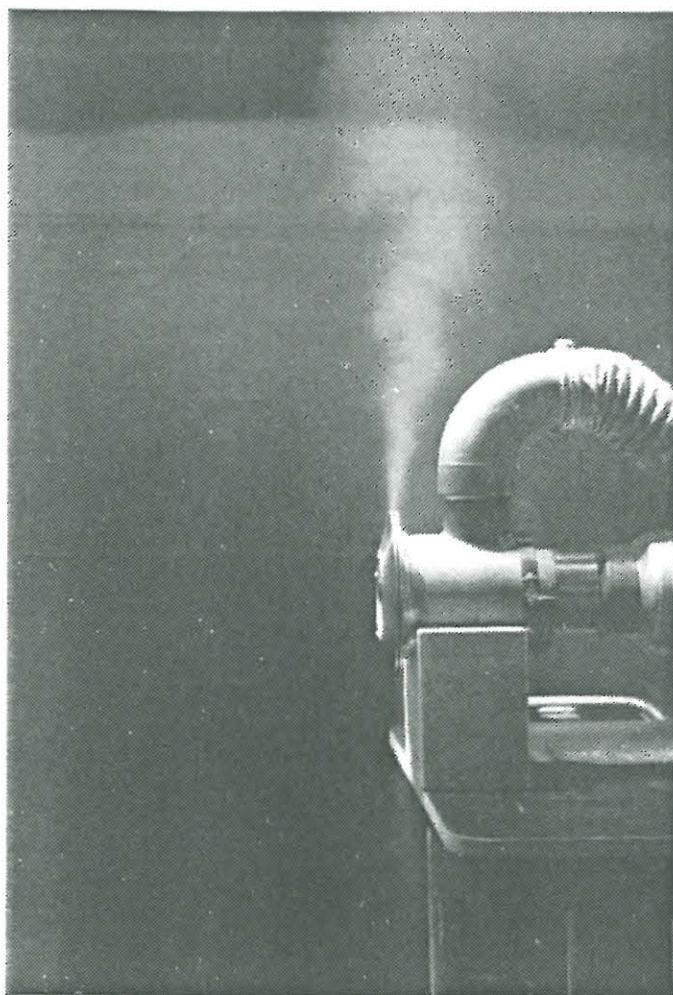
Det fremgår af figur 9, at hastighederne er nogenlunde ens i samme radiære afstand fra udsugningsåbningen, hvilket kun-

ne forventes. Dette er jo i øvrigt også tilfældet ved udsugning alene. Ved måling er kontrolleret, at strømningsbillet i figur 9 er symmetrisk om centerlinien, hvorfor kun den ene halvdel er indtegnet.

Strømningsbilledet svarende til figur 8 for bord med bagflange er næsten identisk med figur 9, hvorfor der ikke er anført en særlig figur for dette tilfælde.

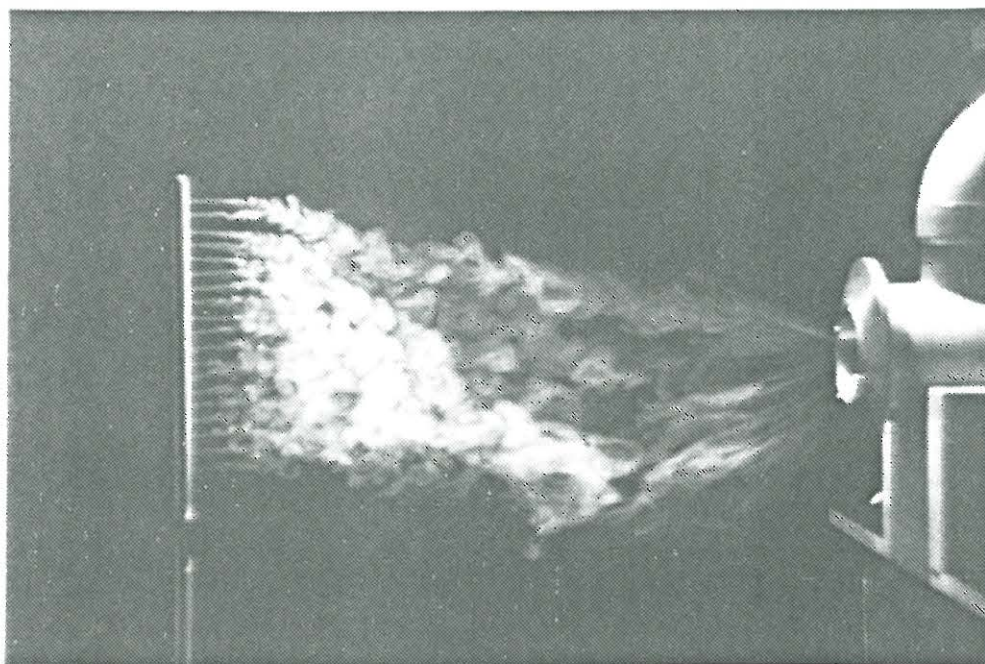
### 1.5. Visualisering af strømningsforløb

På de følgende billeder er strømningsforløbet synliggjort ved hjælp af røg og et lodret lyssnit gående gennem mundstykkets centerlinie.

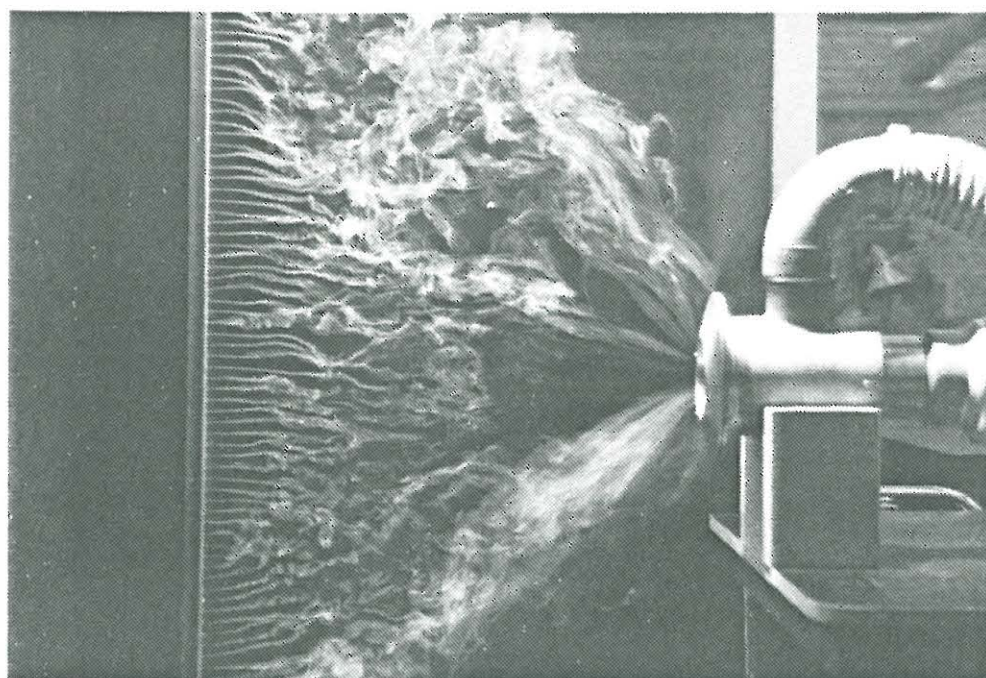


Figur 10. Indblæsningsradialstrålen. Der er kun tilsat røg til indblæsningen.



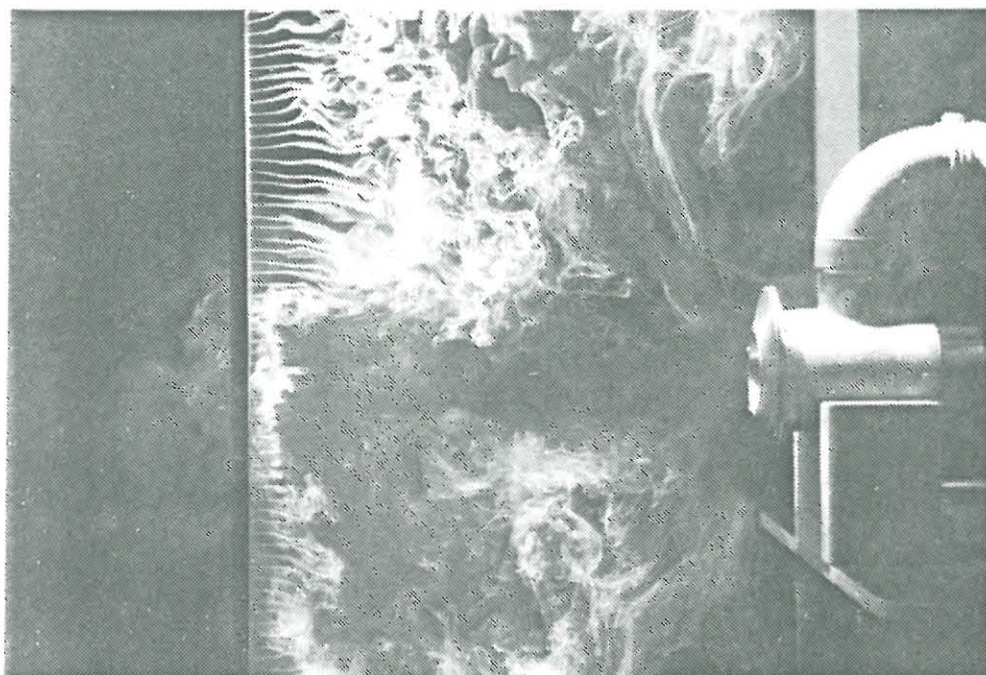


Figur 11. Normalfunktion. Udsugning  $V_u = 300 \text{ m}^3/\text{h}$ , indblæsningshastighed  $v_i = 19 \text{ m/s}$ .



Figur 12. Normalfunktion. Udsugning  $V_u = 300 \text{ m}^3/\text{h}$ , indblæsningshastighed  $v_i = 15 \text{ m/s}$ .





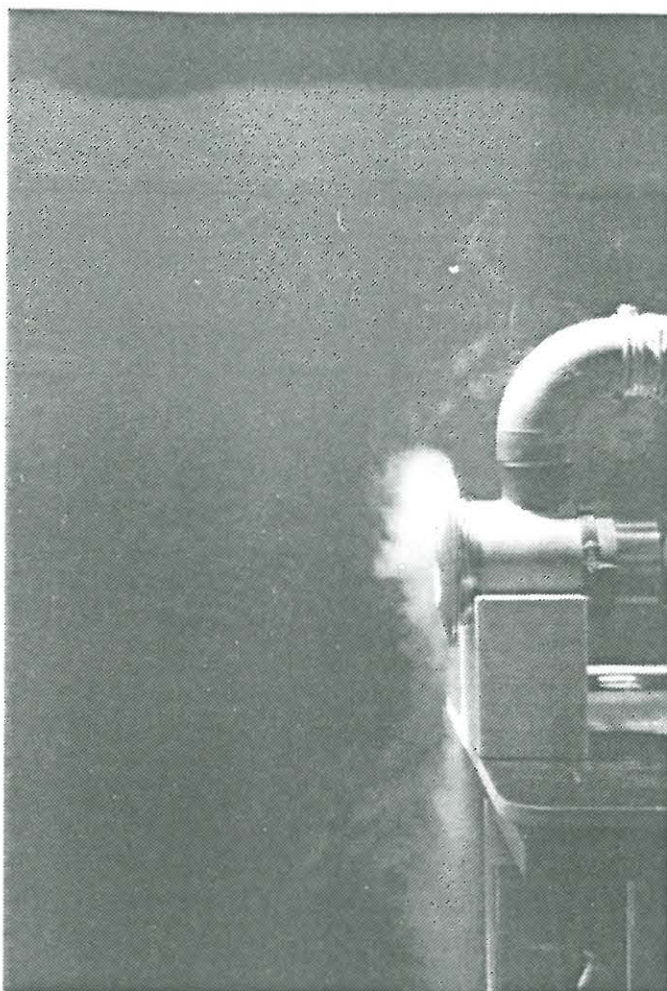
Figur 13. Indblæsning med kritisk hastighed. Røgen blæses væk fra sugeåbningen stik imod hensigten.

Af figur 10 ses indblæsningsstrålen, der hælder svagt bagud, idet forreste flange har en hældning på  $15^\circ$  mens bageste flange er vinkelret på aksen.

På figur 11 er der tilsat røg inden for det effektive område, og det fremgår tydeligt, at ingen del af røgen gribes af indblæsningsradialstrålen.

På figur 12 er der tilsat røg, der også strækker sig uden for det effektive område, og det ses, at noget af røgen rives med af indblæsningen.

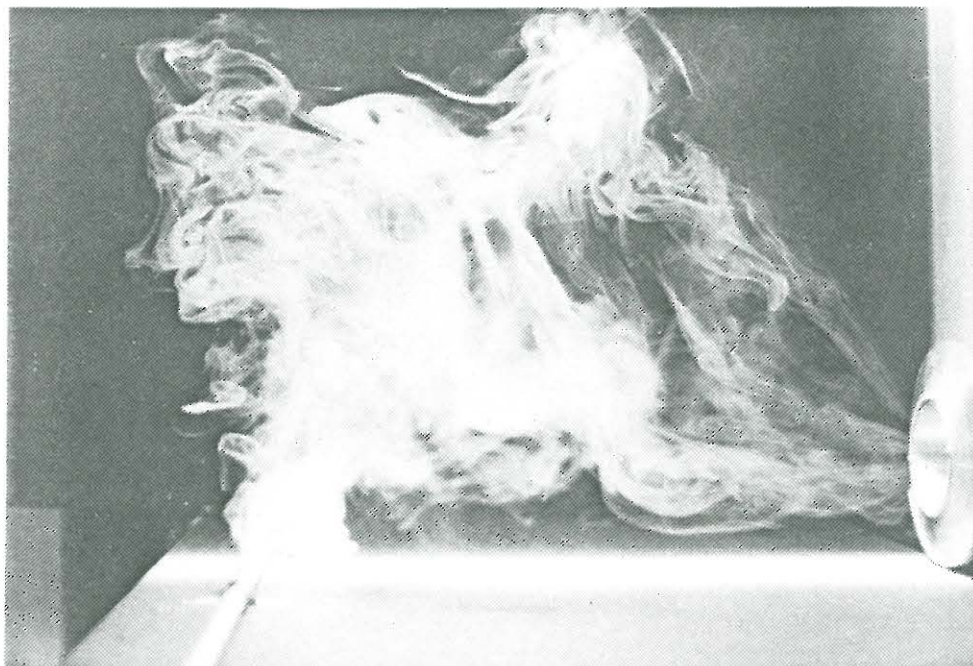
På figur 13 ses indblæsning netop ved kritisk hastighed. Det ses, at i et område omkring aksen blæses røgen bort fra udsugningen. Denne tilstand er meget labil. Under den kritiske hastighed vil indblæsningen blot bøjes om og suges med ud, som figur 14 er et eksempel på. Her er indblæsningen foroven underkritisk, mens den forneden på grund af Coandaeffekten ved klodsen, som mundstykket hviler på, er overkritisk.



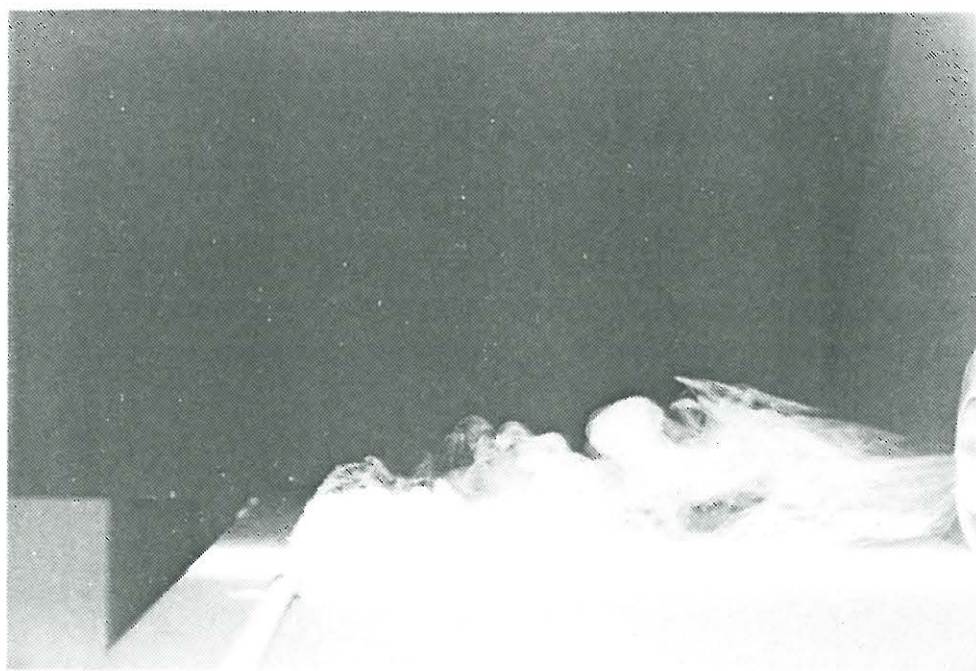
Figur 14. Indblæsning ved underkritisk hastighed foroven, men overkritisk hastighed forneden på grund af Coandaeffekt ved den understøttende klods.

De følgende billeder viser udsugning anbragt i den lodrette væg ved bagkanten af et bord. Nederste trediedel af indblæsningsspalten er afdækket. Røgen tilsættes 10 cm fra bordets forkant, hvilket har vist sig at være det "farligste" sted på grund af turbulens fra bordkanten.





Figur 15. Udsugning i bagvæg ved bord. Udsugning alene  
 $V_u = 300 \text{ m}^3/\text{h}$ .



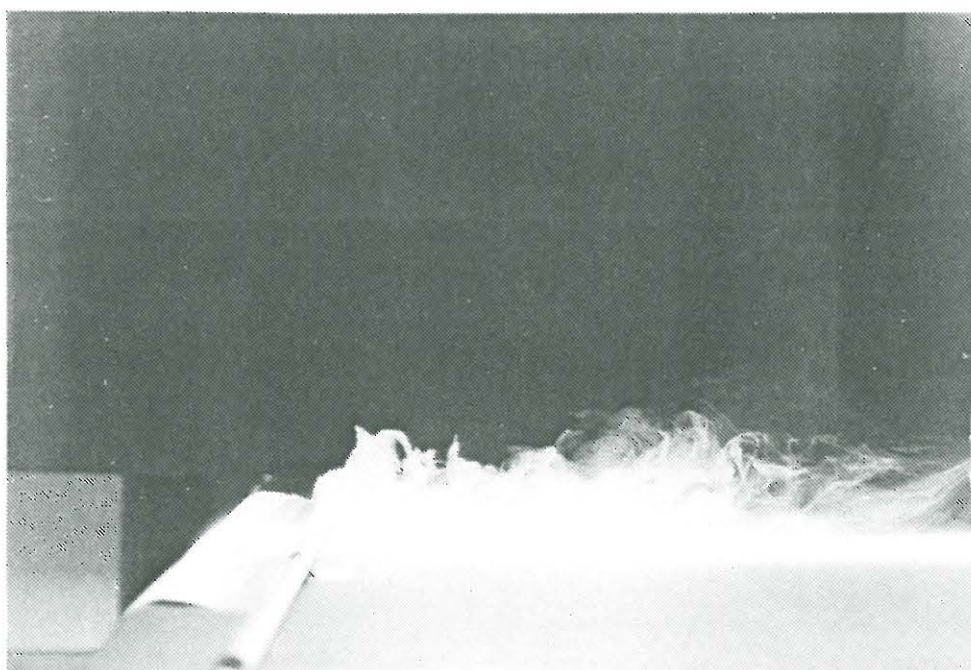
Figur 16. Aerodynamisk styret udsugning i bagvæg ved bord.  
Udsugning  $V_u = 300 \text{ m}^3/\text{h}$ , indblæsningshastighed  
 $v_i = 10 \text{ m/s}$ .



En person, der går forbi en arbejdsplads med udsugning, kan på grund af sin relativt høje hastighed på ca. 1,5 m/s forstyrre strømningsbilledet totalt og i lang tid efter passagen. Figur 17 og 18 er eksempler herpå.



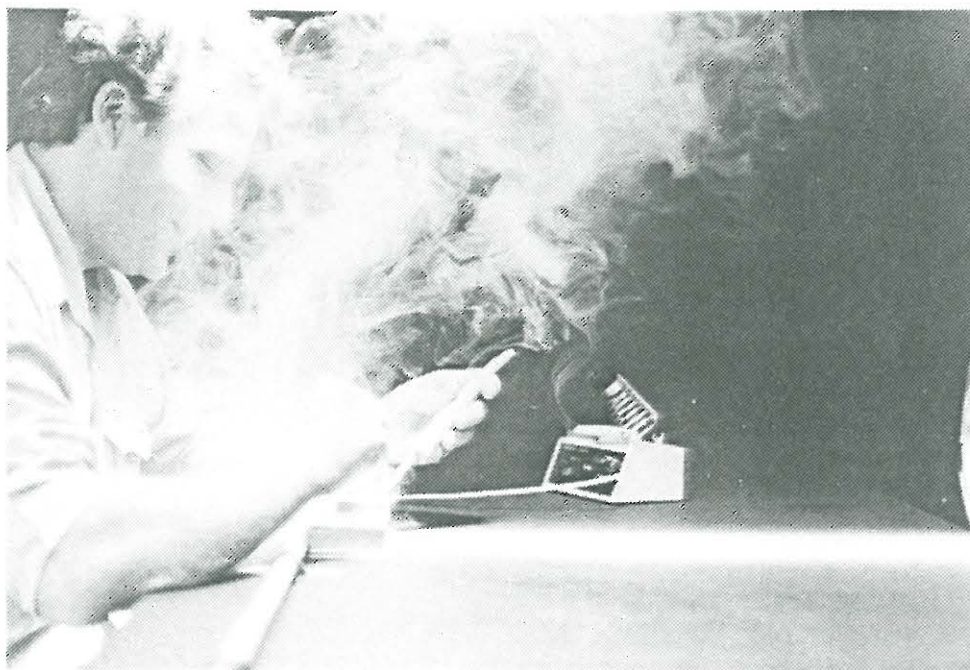
Figur 17. Udsugning i bagvæg ved bord 5 sekunder efter, at en person er gået forbi bordet.  $V_u = 300 \text{ m}^3/\text{h}$ .



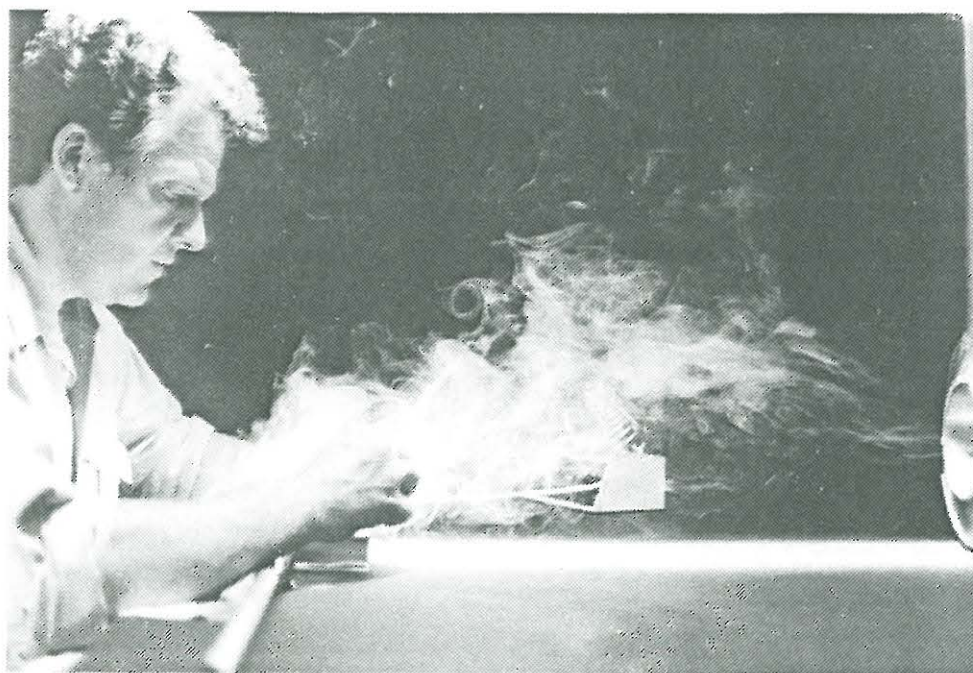
Figur 18. Aerodynamisk styret udsugning i bagvæg ved bord 5 sekunder efter, at en person er gået forbi bordet.  $V_u = 300 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $v_i = 10 \text{ m/s}$ .



På figur 19 og 20 ses et eksempel på anvendelse af udsugning ved en arbejdsplads. Her er efterlignet et lodningssituation. Der tilføres dog ikke forurening ved lodning, men tilsættes røg fra et rør med små huller anbragt 10 cm fra bordets forkant.



Figur 19. Imiteret lodning med sugning i bagvæg ved bord.  
Udsugning alene  $V_u = 300 \text{ m}^3/\text{h}$ .



Figur 20. Imiteret lodning med aerodynamisk styret udsugning i bagvæg ved bord. Udsugning  $V_u = 300 \text{ m}^3/\text{h}$ , indblæsningshastighed  $v_i = 10 \text{ m/s}$ .

Det skal bemærkes, at strømmingerne bliver meget vanskeligere at styre, så snart der bringes en person ind i billedet. Luftten må jo bevæge sig uden om legemet, og denne bevægelse vil forstyrres af konvektionsstrømmene omkring legemet, der er forårsaget af kroppens varme overflade. Desuden vil udånding gennem næsen, der sker ved relativt høje hastigheder, påvirke omgivelserne i meget høj grad. Situationen i figur 20 kan derfor kun opnås, når gribehastigheden på arbejdsstedet er tilstrækkeligt høj, og når en række finesser tages i anvendelse.

### 1.6. Udsugningseffektivitet

At undersøge, hvor stor en del af en lokal forurening, der ved den beskrevne metode kan fjernes direkte, altså uden at blive opblandet i rumluften, er vigtigt, idet man ellers ikke kan vide, om forureningen ikke blot bliver revet med indblæsningsbræmmen og dermed fordelt i rummet.

Ved AUC blev der til bestemmelse af udsugningseffektiviteten anvendt  $\text{CO}_2$  som sporgas. Et sporgasanalyseudstyr målte  $\text{CO}_2$ -koncentrationen i udsugningen efter udsugningsventilatoren. En konstant  $\text{CO}_2$ -mængde blev først tilført direkte til udsugningsåbningen for at bestemme den koncentration, der svarede til 100% effektivitet. Derefter blev den samme  $\text{CO}_2$ -mængde tilført gennem et 35 cm langt rør med 19 små huller anbragt 10 cm fra bordets forkant ( $x = 70$  cm), idet denne placering af arbejdssted med forureningsudvikling er den værste at klare.  $\text{CO}_2$ -koncentrationen i udsugningen i forhold til den  $\text{CO}_2$ -koncentration, der målt med  $\text{CO}_2$  tilført direkte til udsugningsåbningen, vil vi da definere som udsugningens effektivitet ved den angivne forurening.

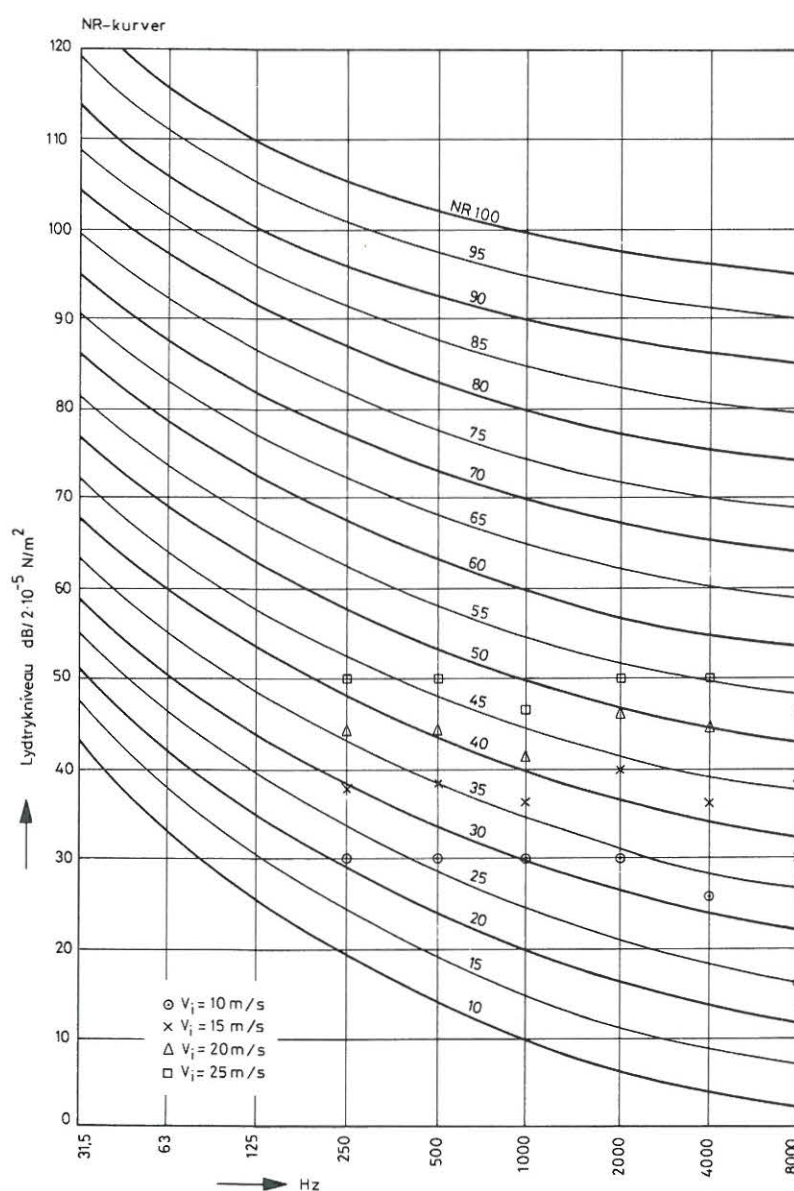
Det er vanskeligt på kort form at gengive resultatet af disse effektivitetsmålinger på grund af de mange parametre såsom forureningens placering, udledningsretning og udledningshastighed, forstyrrelser fra omgivelserne, de valgte gribehastigheder o.s.v. Men det der må have størst interesse at vi de må være, at når alle disse forhold er i orden, vil udsug-



ningseffektiviteten typisk være 95-100%. Ved de rigtige forhold mellem indblæsnings- og udsugningsluftmængder og -hastigheder kan der således skabes et aerodynamisk strømrør, der fører direkte til udsugningsåbningen.

### 1.7. Støjgenerering

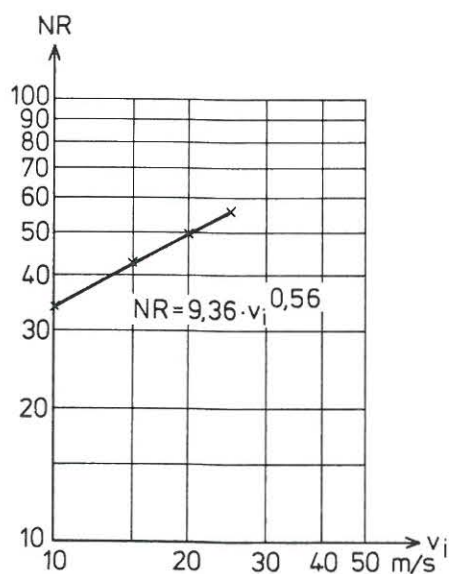
I indblæsningsspalten og i udsugningsåbningen genereres der støj. Da hastighederne er højest i indblæsningsspalten, vil



Figur 21. Støjgenerering fra mundstykke målt 80 cm foran det-  
te ved indblæsningshastighederne 10, 15, 20 og 25 m/s.

støjen herfra helt overdøve støjen fra udsugningen. På figur 21 ses resultatet af en række målinger af støjgenereringen ved forskellige indblæsningshastigheder. Da mundstykket normalt skal anvendes i nærheden af en operatør, vil denne normalt befinde sig i støjens nærfelt, og støjmålingerne er derfor foretaget, hvor en operatør typisk vil befinde sig, nemlig 80 cm foran mundstykket.

Af figur 21 fremgår, at støjen fra mundstykket ved de pågældende indblæsningshastigheder svarer til de på figur 22 angivne NR-værdier.



Figur 22. Støjniveau målt 80 cm foran munden som funktion af indblæsningshastigheden.

Det ses af figur 22, at det tilladelige støjniveau kan sætte en grænse for, hvor høje indblæsningshastigheder, der bør vælges. Men i værksteder, fabrikker og lignende vil det ikke være vanskeligt at overholde de givne støjgrænser.



### 1.8. Anvendelsesområder

Det beskrevne system er ikke velegnet til afsugning af større arealer som f.eks. et kar med syre eller lignende. Til en sådan anvendelse er udsugningsstrømrøret for snævert.

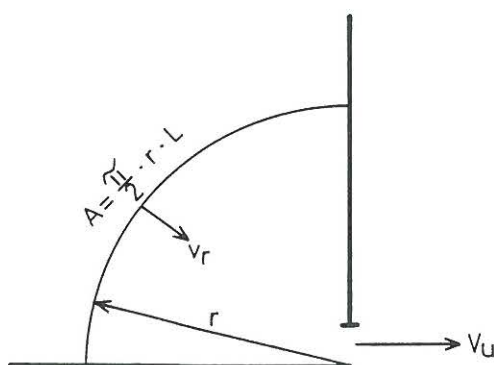
Derimod er systemet traditionelle systemer overlegent, når en forurening er punktformig, og når der kræves manøvreringsplads omkring forureningen, som gør det vanskeligt at få en almindelig sugeåbning tæt nok på forureningskilden. I tilfælde, hvor forurening skal fjernes fra en operatørs åndingszone, kan systemet være den eneste effektive mulighed og almindelig udsugning langt overlegent.

## 2. Todimensionale strømninger

Ved tilfældet todimensional udsugning skal her forstås det strømningsbillede, der opstår, når en spalteformet udsugning begrænses af sideflader, således at luftens strømning mod udsugningsspalten kun bliver todimensional.

### 2.1. Beregning af hastigheder for udsugning alene

Anbringes en spalteformet udsugning som vist på figur 23 i hjørnet mellem et bord og en lodret bagvæg fås en stort set ligelig tilstrømning mod sugespalten fra en kvartcylinder. I afstanden  $r$  vil strømningshastighederne være numerisk af samme størrelse, og de vil være rettet mod åbningen.



Figur 23. Principskitse af konventionel spalteformet udsugning mellem bord og bagvæg.  $r$  = afstand fra hjørne (m),  $v_r$  = hastighed (m/s) i afstanden  $r$ ,  $A$  = areallet (m<sup>2</sup>) af en kvartcylinder med længden  $L$  (m) = bordets længde og  $V_u$  = udsuget luftmængde (m<sup>3</sup>/s).

De af udsugningen forårsagede strømningshastigheder vil da være givet ved:

$$v_r = \frac{V_u}{A} = \frac{V_u}{\frac{\pi}{2} \cdot r \cdot L} \quad (2)$$

Det vil altså sige, at teoretisk set vil  $v_r$  aftage proportionalt med afstanden  $r$  fra sugeåbningen. Her er dog set bort fra udsugningens lodrette udstrækning, d.v.s. spaltehøjden, ligesom der er set bort fra gnidningsmodstand ved begrænsningsfladerne og påvirkning fra omgivelserne.

For eksempel fås for  $V_u = 400 \text{ m}^3/\text{h} = 0,111 \text{ m}^3/\text{s}$  og  $L = 1,6 \text{ m}$ :

$$v_r = \frac{V_u}{\frac{\pi}{2} \cdot r \cdot L} = \frac{0,111 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 2}{\pi \cdot r \cdot 1,6 \text{ m}} = \frac{0,0442}{r}$$

hvor  $r$  er afstanden fra åbningen i m og

$v_r$  er hastigheden i m/s.

I det følgende vil denne beregnede sammenhæng blive sammenlignet med målinger.

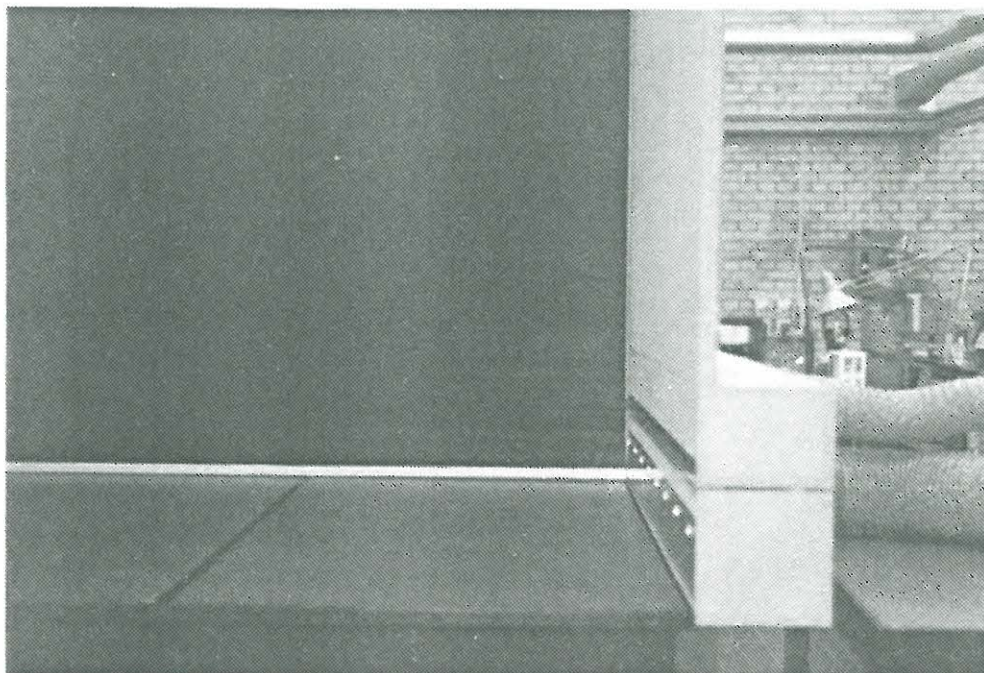
## 2.2. Beskrivelse af forsøgsopstilling og princip

Det var en nærliggende tanke, at aerodynamisk styring af udsugning også kunne lade sig gøre i det todimensionale tilfælde, og at det ville være formålstjenligt at vælge nogenlunde de samme dimensioner, luftmængder og hastigheder. På figur 24 og 25 ses den anvendte forsøgsopstilling.

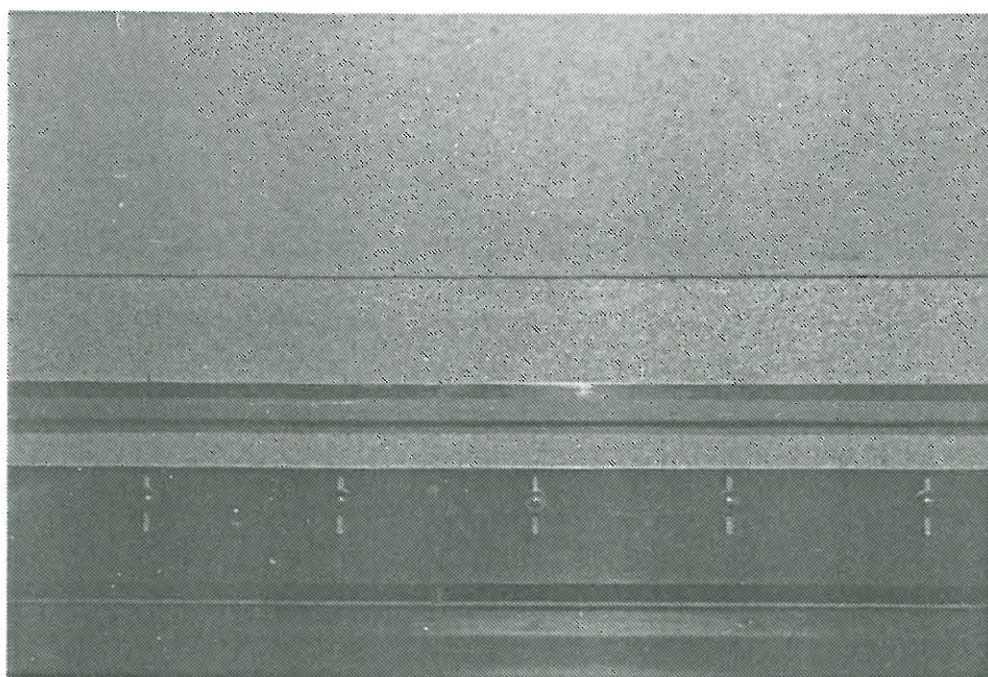
Udsugningen sker gennem en kasse, der har længden  $L = 1,60 \text{ m}$  ligesom bordets længde, og som har et tværsnit på ca.  $20 \times 20 \text{ cm}$ . Nederst og i flugt med bordets bagkant findes udsugningspalten, hvis højde kan varieres ved hjælp af indstillelige aluminiumsplader.

Indblæsningen sker gennem en kasse, der ligeledes har bordets længde  $L = 1,60 \text{ m}$ , og som er anbragt oven på udsugningskassen. Nederst findes indblæsningsspalten, som udadtil begrænses af en vinkelformet aluminiumsprofil, der sørger for, at indblæsningen er lodret og følger den lodrette plade, der er sat oven på indblæsningsspaltehøjden er  $2,3 \text{ mm}$ .





Figur 24. Forsøgsopstilling for todimensional strømning set fra siden. Højre sideafskærmning er fjernet for at kunne taget billedet.

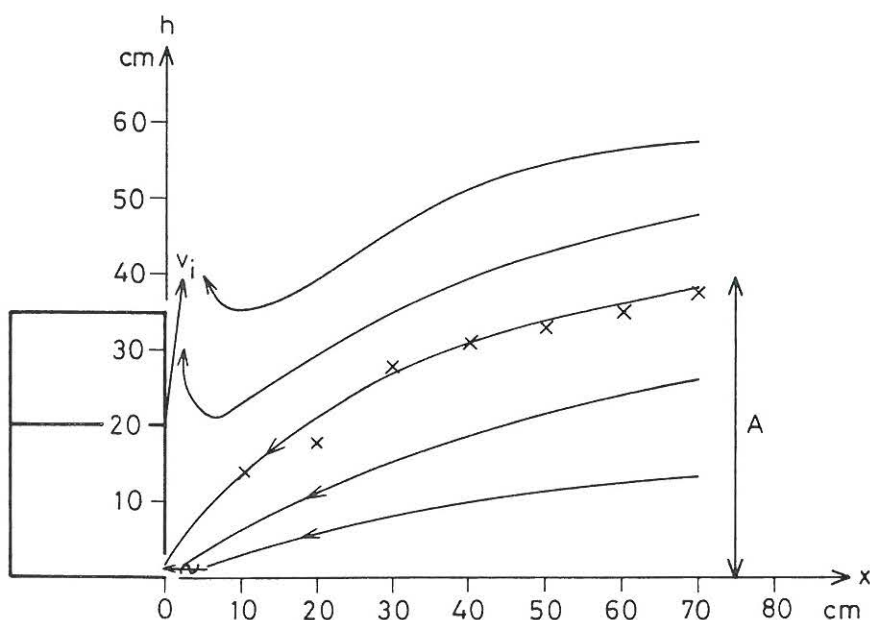


Figur 25. Forsøgsopstilling for todimensional strømning set forfra, d.v.s. ind mod udsugnings- og indblæsnings-spalterne.



Ved røgforsøg lægges et lodret lyssnit gennem bordets og indblæsnings- og udsugningsspaltens midte. Venstre sidevæg er et sort gardin, som giver en god baggrund ved fotografering. To borde hver med bredden 80 cm er stillet uden for hinanden, så at den samlede bordbredde også bliver 1,60 m.

Princippet for den aerodynamiske udsugning i det todimensionale tilfælde svarer til princippet i det tredimensionale tilfælde.

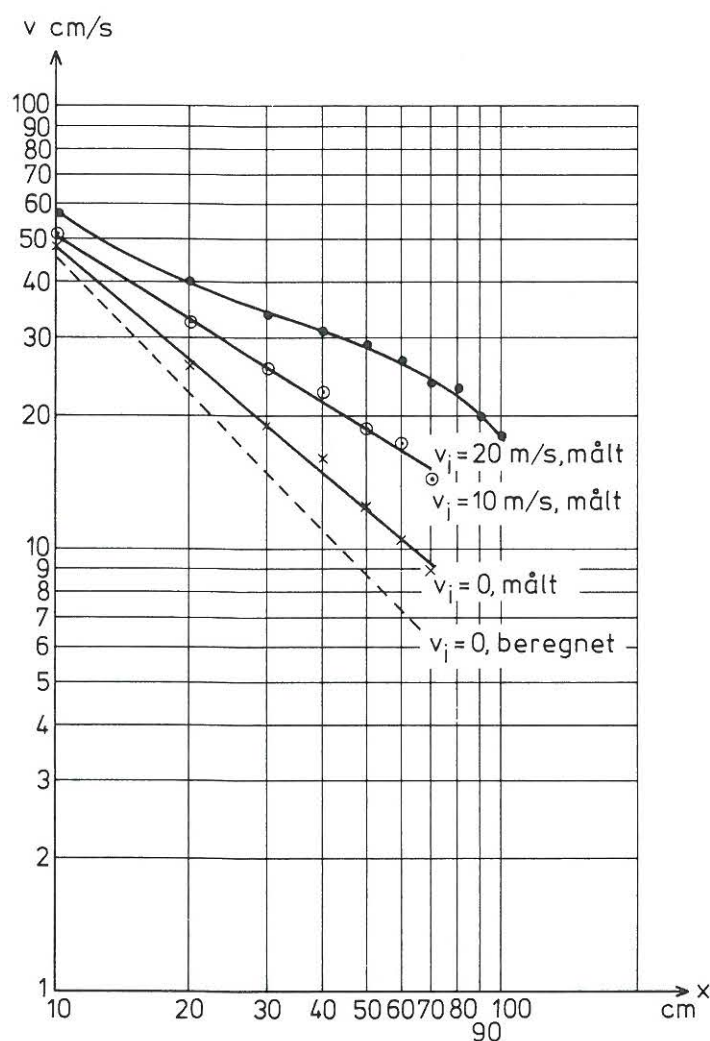


Figur 26. Principskitse.  $A$  = effektivt udsugningsområde.

Hovedprincippet er også i dette tilfælde, at indblæsningen medriver luft fra omgivelserne, så at udsugningsområdet formindskes til kun at omfatte ca. det på figur 26 angivne område  $A$ . Område  $A$  formindskes, når indblæsningshastigheden øges. Også i det todimensionale tilfælde vil der være en kritisk hastighed, men på grund af Coandaeffekten ved den lodrette væg er denne så lav, at den ingen praktisk betydning har.

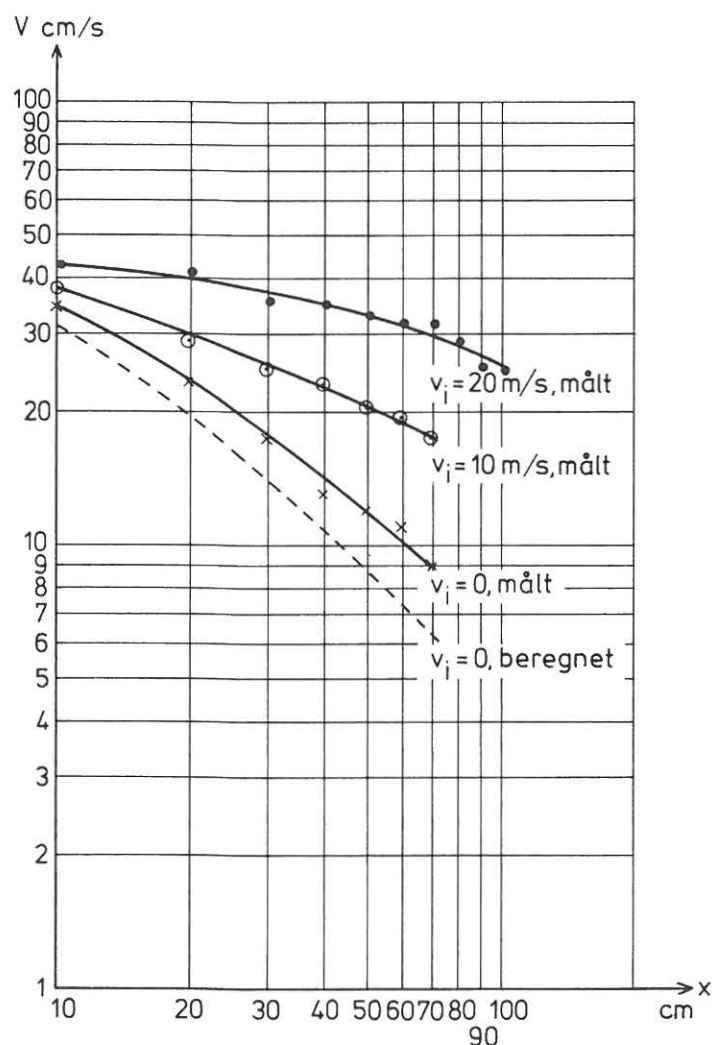
### 2.3. Måling af lufthastigheder og strømningsforløb

Anbringes indblæsning og udsugning som angivet på figur 24 og 25 kan gribehastighederne måles i forskellige højder over bordet, dels for udsugning alene, dels for udsugning med indblæsning på. På figur 27 er angivet dels de ud fra afsnit 2.1 ligning (2) beregnede hastigheder for udsugning alene, dels de målte hastigheder for dette tilfælde samt de målte hastigheder, når der er indblæsning på. Angivelsen  $v_i$  er den numeriske værdi af hastigheden. Hastighedens retning er for udsugning alene mod udsugningsspalten. Hastighedens retning, når der også er indblæsning, fremgår af det følgende.



Figur 27. Gribehastigheden  $v$  3 cm over bord som funktion af den vandrette afstand  $x$  fra sugespalten. Indblæsningshastigheden er parameter.

De målte hastigheder i 10 cm's højde over bordet er generelt lidt højere som figur 28 angiver.



Figur 28. Gribehastigheden  $v$  10 cm over bord som funktion af den vandrette afstand  $x$  fra sugespalten. Indblæsningshastigheden er parameter.

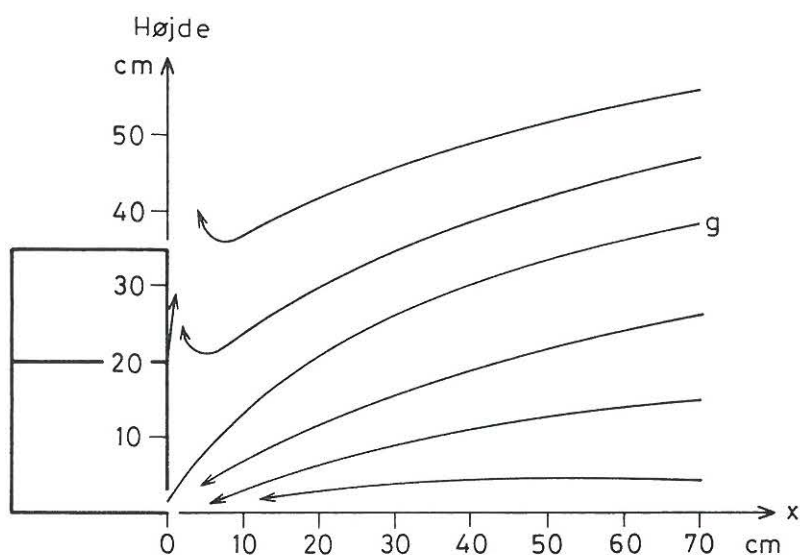
Af figur 27 og 28 fremgår, at de beregnede og de målte hastigheder for  $v_i = 0$  ikke stemmer helt godt overens. Årsagen her til kan være, at hastighederne ved de begrænsende flader på grund af gnidningsmodstanden er lavere end beregnet, og til gengæld herfor må de målte hastigheder i det frie felt blive højere end beregnet.

Af figur 27 og 28 fremgår også, at der er store fordele ved

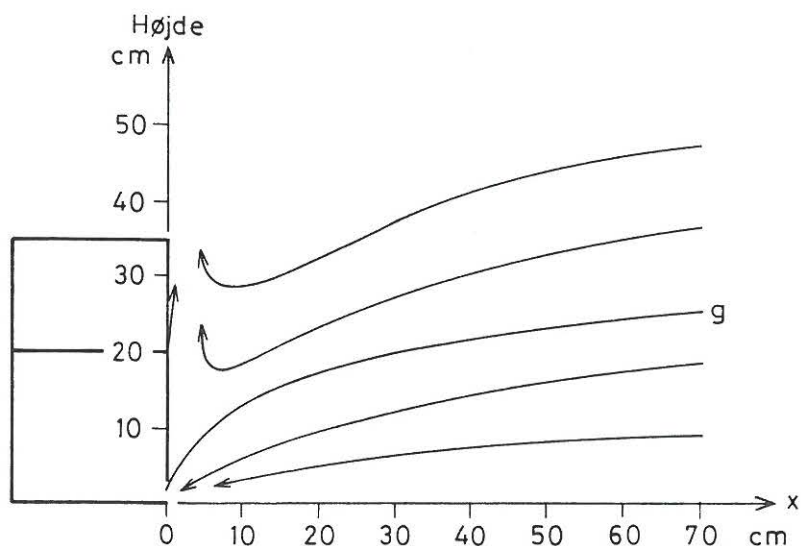


at tilføje indblæsning, når man ønsker en vis gribehastighed i en vis afstand x. Ønskes f.eks. en gribehastighed = 20 cm/s, hvilket kan være rimeligt til en gas- eller partikelforurening, er rækkevidden for udsugning alene kun 25-28 cm. Teoretisk kan man fordoble denne rækkevidde ved at fordoble den udsugede luftmængde til 800 m<sup>3</sup>/h, i praksis skal luftmængden øges endnu mere, og dette vil være dyrt i varmekonsum. Den samme rækkevidde på ca. 56 cm kan opnås ved at holde den udsugede luftmængde fast på 400 m<sup>3</sup>/h og tilføje en indblæsning af luft ved  $v_i \approx 13$  m/s, hvilket svarer til en indblæsningsluftmængde på 172 m<sup>3</sup>/h. Men denne luft kan tages fra rummet, og varmekonsumet hertil er således = 0. Ønskes en større rækkevidde kan indblæsningshastigheden øges endnu mere, når blot støjgrænserne ikke overskrides.

Strømningsforløbet, når indblæsning er i gang, fremgår af figur 29 og 30. Strømlinierne er fastlagt dels på baggrund af røgforsøg, dels på baggrund af hastighedsmålinger + beregninger.



Figur 29. Strømlinier for aerodynamisk todimensional udsugning.  $V_u = 400$  m<sup>3</sup>/h,  $v_i = 10$  m/s. Strømlinie g angiver nogenlunde grænsekurven mellem udsuget luft og luft medrevet af indblæsningen.



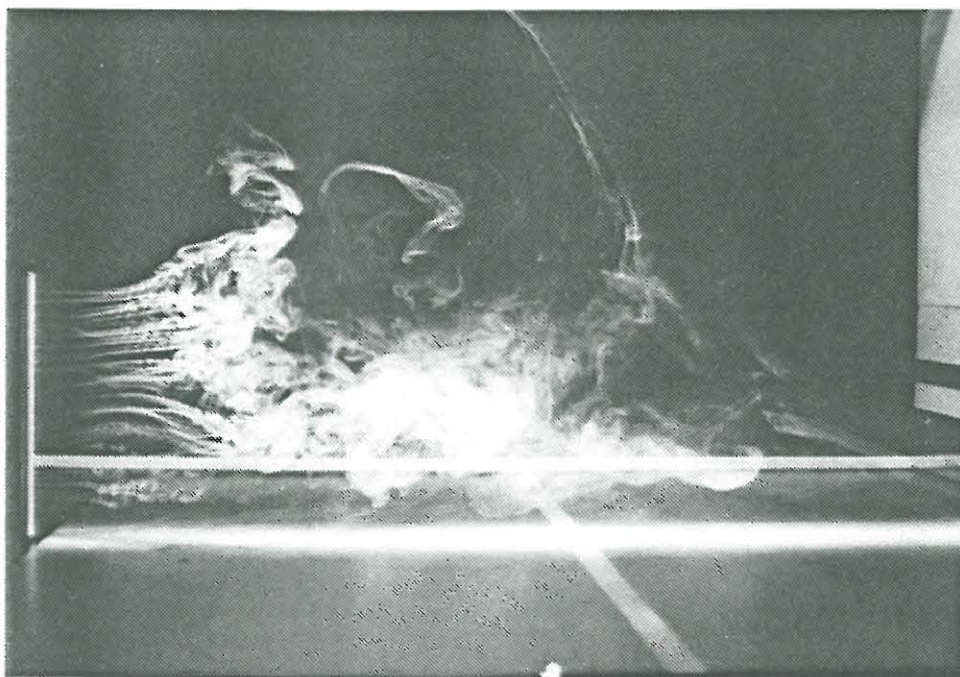
Figur 30. Strømlinier for aerodynamisk todimensional udsugning.  $V_u = 400 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $v_i = 20 \text{ m/s}$ . Strømlinie g angiver nogenlunde grænsekurven mellem udsuget luft og luft medrevet af indblæsningen.

Af figur 29 og 30 fremgår, at når indblæsningshastigheden  $v_i$  øges, bliver strømlinierne fladere, og den effektive udsugningshøjde således mindre. Grænsekurven g ligger dog ikke fast, men varierer meget med forstyrrelser fra omgivelserne.

#### 2.4. Visualisering af strømningsforløb

På figur 31, 32 og 33 ses røgens bevægelser mod sugespalten til højre, når røgrøret er anbragt lodret lige uden for bordkanten, d.v.s. for  $x = 160 \text{ cm}$ .

På figur 34, 35 og 36 ses røgbevægelserne mod udsugningen, når røgrøret er anbragt ved  $x = 100 \text{ cm}$ , og røgen blæser lodret op.



Figur 31.  $V_u = 400 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $v_i = 0$

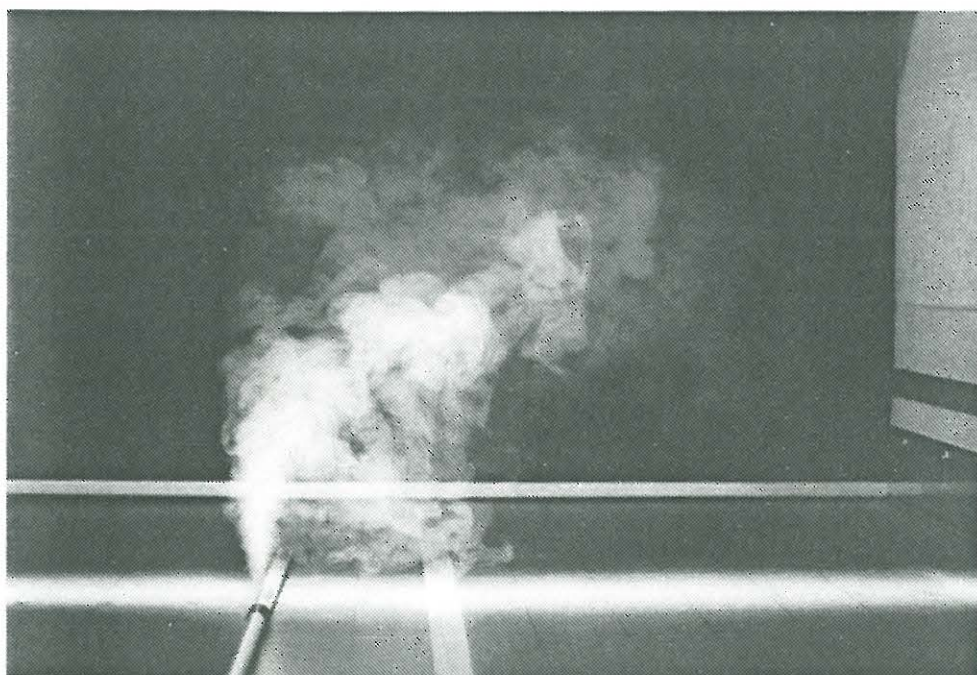


Figur 32.  $V_u = 400 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $v_i = 10 \text{ m/s}$





Figur 33.  $V_u = 400 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $v_i = 15 \text{ m/s}$

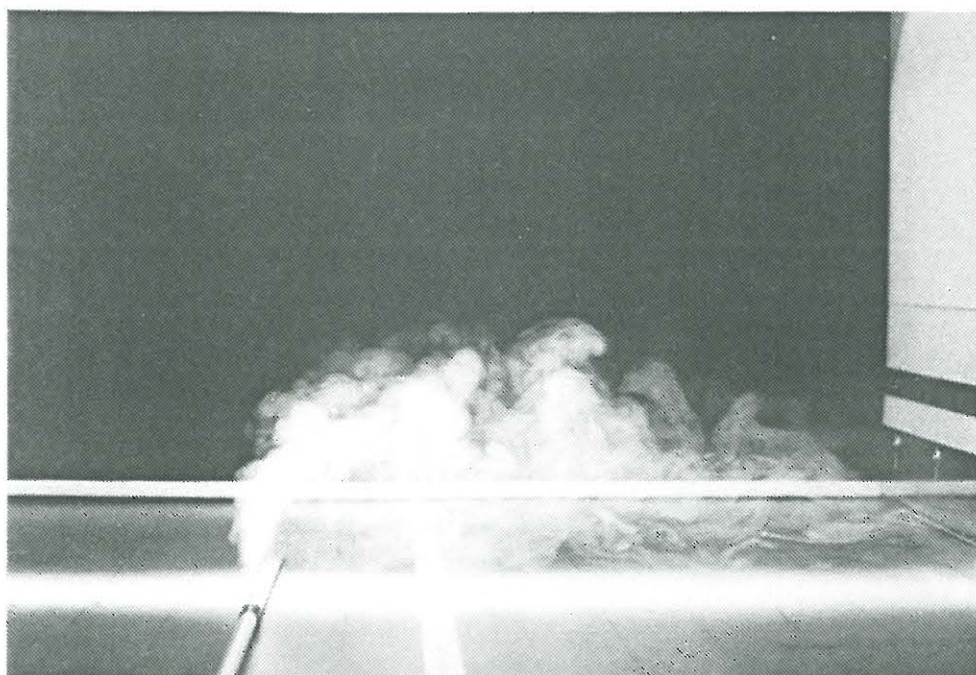


Figur 34.  $V_u = 400 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $v_i = 0$





Figur 35.  $V_u = 400 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $v_i = 10 \text{ m/s}$



Figur 36.  $V_u = 400 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $v_i = 15 \text{ m/s}$

## 2.5. Udsugningseffektivitet

Også i det todimensionale tilfælde er udsugningen næsten 100% effektiv, når blot forureningstilførslen holdes inden for det effektive område, det vil sige under en vis højde regnet fra bordoverfladen.

På figur 29 og 30 er angivet en beregnet grænsekurve  $g$  mellem det område, der udsuges, og det område, der medrives af indblæsningen. Men denne grænsekurve er ikke fast, tværtimod vil forstyrrelser fra omgivelserne få grænsen til at bølge op og ned. For at være sikker på en effektiv udsugning må forureningen derfor udvikles et stykke under grænsekurven  $g$ , især når der er forstyrrelser fra omgivelserne. Størst sikkerhed fås naturligt nok, når forureningen udvikles ved bordoverfladen.

## 2.6. Støjgenerering

Sammenhængen mellem støjgenereringen i indblæsningen og indblæsningshastigheden er omtrent den samme som for det tredimensionale mundstykke. Afgørende for støjgenereringen er, om luften i indblæsningen accelereres "blødt" eller brat, og om den skal passere skarpe hjørner eller kanter, der giver hvirveldannelse og støj. Det kan således betale sig at ofre lidt omhu på udførelsen af indblæsningen, således at luften fra et trykkammer føres gennem et pænt afrundet indløb.

## 2.7. Anvendelsesområder

Aerodynamisk styret todimensional spalteformet udsugning er egnet til afsugning af større arealer som f.eks. et bord, et syrebad eller lignende. Hvis forureningen, der skal fjernes, udvikles i en højde over overfladen, som er i nærheden af eller højere end den på figur 29 og 30 viste grænsekurve  $g$ , er systemet ikke egnet.



For at princippet skal virke efter hensigten, må der være en god frihøjde over overfladen, således at den opadgående luftstrøm ikke bøjes om og med betragtelig hastighed løber ind i tilstrømningszonen til spalteudsugningen. I f.eks. en svejsekabine, der foroven er lukket med et loft, vil systemet således ikke kunne virke.

Hvis der står eller sidder en person foran karret eller bordet, vil denne kunne ødelægge det ønskede strømningsforløb. Dette kan ske på flere måder. De konvektive opadgående luftstrømme omkring personen kan påvirke strømningsforløbet. Udånding gennem næse eller mund kan momentant give en meget kraftig påvirkning af omgivelserne. Endelig vil personen ved at læne sig mod kanten af bordet eller karret forhindre den frie tilstrømning af luft og vil derved give en lævirkning med hvirveldannelser til følge. Med personer må der derfor tages særlige forholdsregler, som må klares i det enkelte tilfælde.

Men med disse forbehold må systemet siges at være traditionel spalteformet udsugning overlegent, idet der kræves en mindre udsuget luftmængde for at opnå en ønsket gribehastighed. Ganske vist må der så indblæses en luftmængde, der kan være af samme størrelsesorden som besparelsen, men denne indblæsningsluft behøver ikke at være udeluft, men kan tages fra rumluften og kræver således intet energiforbrug til opvarmning. I rum, hvor lokaludsugningen er dimensionerende for ventilationsluftmængden, vil denne således kunne reduceres ved anvendelse af aerodynamisk styret udsugning, og dermed vil energiforbruget til opvarmning af friskluften formindskes.

### 3. Konklusion

Sammenlignes figur 8, som angiver gribehastigheder for det tredimensionale tilfælde af aerodynamisk styret udsugning, med figur 27, som gælder for det todimensionale tilfælde, ses, som man kunne vente, en mindre hældning for linierne i det todimensionale tilfælde. Men man kan ikke af den grund sige, at den todimensionale styrede udsugning er den bedste. Det afhænger af opgaven.

Den tredimensionale aerodynamisk styrede udsugning - Aaberg-systemet - egner sig til en punktformet forureningskilde. Den todimensionale aerodynamisk styrede udsugning er bedre, når man ønsker udsugning fra en overflade f.eks. et bord, et syrebæd eller lignende.

Det er troligt, at disse to systemer i fremtiden vil være et godt supplement til traditionel udsugning, specielt til opgaver i industrien, hvor giftige dampe eller partikler skal fjernes fra menneskers åndingszone.

